

La complejidad de las mezclas sustractivas y su predicción a partir del análisis espectral

Jorge Barrio

Departamento de Física y Química, I.E.S. Vega del Jarama, Avda. Irún 18, 28830 San Fernando de Henares, Madrid, España. jorgebarrio@telefonica.net

[Recibido en abril de 2010, aceptado en noviembre de 2010]

Cuando se aborda en Óptica la mezcla sustractiva del color, solemos enunciar una especie de recetas acerca del resultado que se obtiene de combinar diversos colores. Sin embargo, como se detalla en el presente artículo, no siempre es predecible a priori el resultado de una mezcla sustractiva, pudiéndose obtener incluso resultados paradójicos. Como conclusión, puede afirmarse que la única regla fija que nos permite predecir el resultado de una mezcla sustractiva de dos o más colores es el análisis espectral.

Palabras clave: Colores; Mezcla sustractiva; Transmitancia; Análisis espectral.

The complexity of subtractive mixture and its prediction from spectral analysis

When subtractive color mixture is taught in Optics, we usually state some kind of rules on the result that will be obtained by mixing different colors. However, as detailed in this paper, the result of a subtractive mixture is not always predictable and even paradoxical results may be obtained. We can conclude that the only rule that allows us to predict the result of a subtractive mixture of two or more colors is spectral analysis.

Keywords: Colors; Subtractive mixture; Transmittance; Spectral analysis.

Introducción

La mayoría de nuestros alumnos, ya sean del nivel de Secundaria, Bachillerato o incluso con formación universitaria en áreas científicas, suelen estar más familiarizados con los principios básicos de la mezcla sustractiva de colores que con los que rigen la mezcla aditiva. Sin duda, la razón de esta “asimetría” tiene que ver con motivos eminentemente prácticos; es la mezcla que empezaron a experimentar la primera vez que garabatearon un papel con lápices de colores y actualmente es la que gobierna la impresión de sus documentos en color.

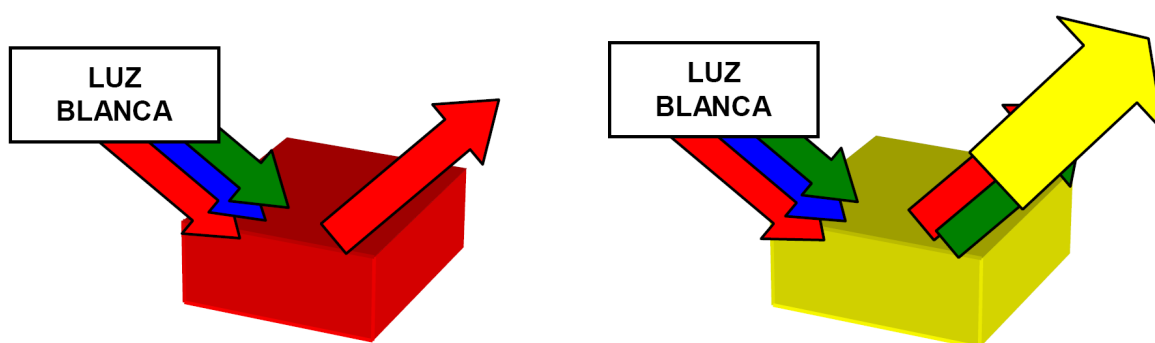


Figura 1. Mecanismo básico del color por reflexión de los cuerpos opacos.

El resultado de una mezcla sustractiva de pigmentos de colores puede interpretarse a partir del mecanismo de “color por reflexión (y absorción)” de los cuerpos opacos. De un modo simple, diremos que un cuerpo opaco iluminado con luz blanca es rojo si ésta es la única componente del espectro visible que refleja, absorbiendo todas las demás. De modo similar, un cuerpo se percibe amarillo si ésta es la única componente espectral visible que refleja, si bien también

puede obtenerse la misma percepción metamérica si refleja las componentes roja y verde, cuya mezcla aditiva se nos presenta como amarillo, absorbiendo las demás (figura 1).

La superposición de filtros coloreados también se rige por el principio de mezcla sustractiva, aunque el mecanismo ahora subyacente es el de “color por transmisión”.

La explicación del resultado de una mezcla de pigmentos cian y amarillo, por ejemplo, tiene una base sencilla en función de lo explicado; un pigmento cian lo es porque refleja el verde y el azul, mientras absorbe todos los demás colores. Un pigmento es amarillo porque refleja el rojo y el verde, absorbiendo los demás colores. Si procedemos a mezclar cian y amarillo, el pigmento cian absorberá la componente roja del amarillo, mientras que éste absorberá la componente azul del cian. El resultado es que la única reflexión que surge del resultado de la combinación es la verde, color final que se percibe. Del mismo modo, se pueden explicar el resto de combinaciones cromáticas, cuyo resultado aparece en el clásico diagrama cromático de la mezcla sustractiva presente en numerosos libros de Física y de Educación Plástica, tal como se muestra en la figura 2.

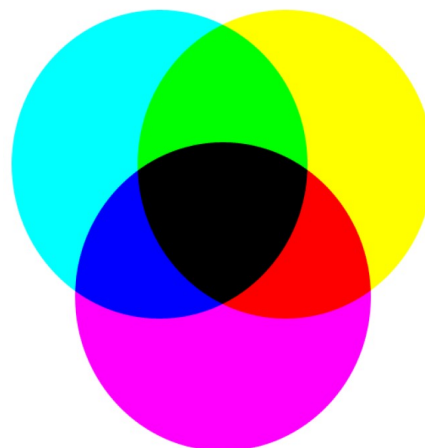


Figura 2. Diagrama de la mezcla sustractiva de pigmentos de color.

En el presente artículo se muestran algunas experiencias con filtros de diversos colores que pretenden demostrar que el color resultante de una mezcla sustractiva no siempre es predecible y que solo podemos aventurar con seguridad el resultado si se conocen detalladamente los espectros de reflectancia o transmitancia de dichos filtros (Nassau 2001). De lo contrario, como se tendrá ocasión de ver, el resultado podría ser paradójico.

Parte experimental

Para el desarrollo de las experiencias descritas a continuación se han empleado los siguientes filtros de Edmund Optics: filtro naranja de 50 mm × 50 mm (ref. M32-764), filtro amarillo de banda estrecha de 50 mm × 50 mm (ref. M43-180), filtros aditivos rojo, azul y verde de 50 mm de diámetro (ref. M52-547) y filtros sustractivos cian, magenta y amarillo de 50 mm × 50 mm (ref. M46-141).

Los espectros de transmitancia de todos los filtros se han realizado con un espectrofotómetro modelo U-2010 de la marca Hitachi en el laboratorio de Fotónica del Departamento de Física de Materiales de la Universidad Autónoma de Madrid y se obtenían mediante el programa Spectra Match, si bien el resultado gráfico final que se expone en el presente artículo se ha realizado con el programa Microcal Origin 6.0.

A continuación se describen las distintas experiencias propuestas.

Experiencia 1: naranja + amarillo = ?

Materiales:

- Dos filtros amarillos (de banda ancha y de banda estrecha) y uno naranja.
- Dos focos de luz blanca.

La superposición de filtros es una mezcla sustractiva. De haber reglas fijas para este tipo de mezcla, podríamos suponer que la superposición de dos filtros, por ejemplo, naranja y amarillo, debería dar siempre un mismo resultado. En esta experiencia se verá que esto no siempre es así, de modo que el resultado puede ser paradójico. En un caso, al combinar el amarillo con el naranja, el resultado es amarillo, mientras que en el segundo caso, al combinar los dos mismos colores, el resultado es naranja. ¿Cómo es esto posible?

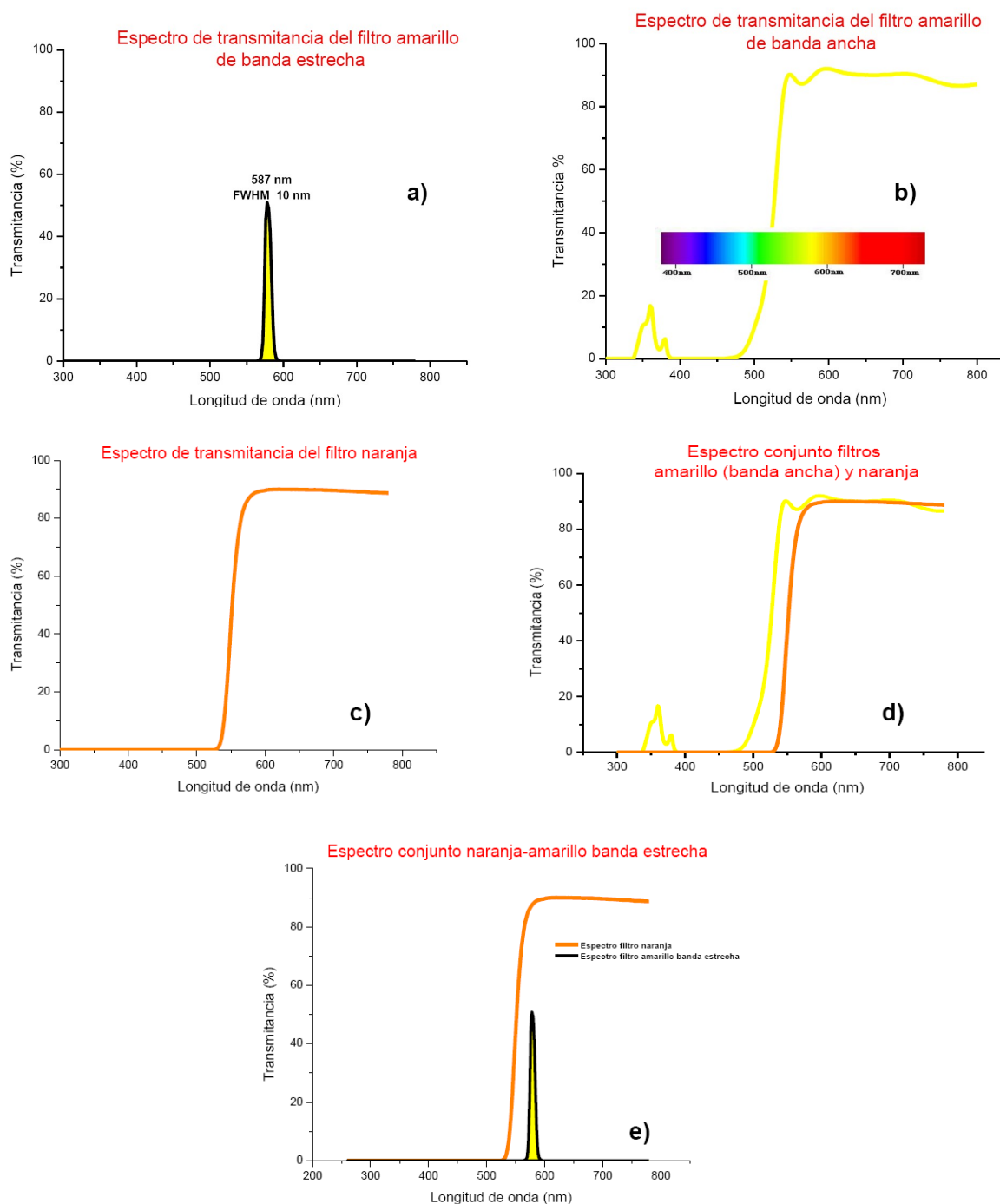


Figura 3. (a) Espectro de transmitancia del filtro amarillo de banda estrecha. Puede observarse que presenta transmitancia centrada en 587 nm y con un ancho a media altura de 10 nm. (b) Espectro de transmitancia del filtro amarillo de banda ancha. Puede observarse que presenta un 90% de transmitancia a partir de 550 nm aproximadamente. (c) Espectro de transmitancia del filtro naranja. (d) Espectro comparativo de los filtros naranja y amarillo de banda ancha. (e) Espectro comparativo de los filtros naranja y amarillo de banda estrecha.

Resultaría imposible dar una explicación a este hecho, si no es contemplando cuáles son los espectros de transmitancia (o absorción) de los filtros empleados. Al hacerlo encontramos la explicación a esta paradoja (figuras 3 a,b,c,d y e).

Como se aprecia en la figura 3a, uno de los filtros amarillos es de banda estrecha, presentando un máximo de transmitancia a 587 nm y un ancho de banda a media altura de tan solo 10 nm. Por el contrario, el otro filtro amarillo (figura 3b) presenta una transmitancia de un 90 % a partir de unos 550 nm. Al superponer un filtro naranja a cada uno de los dos anteriores, solo el rango de transmitancia común a ambos filtros (naranja y amarillo) será el que determine el color resultante de la mezcla. Como se desprende de la figura 3d, la única transmisión común a ambos filtros es la que corresponde al filtro naranja, de ahí que, en ese caso, se aprecie el naranja como resultado de la mezcla.

Sin embargo, de la figura 3e se deduce que la única transmisión común es la correspondiente al filtro amarillo de banda estrecha, de modo que la superposición del filtro naranja ahora equivale a anteponer un filtro transparente, por lo que el resultado de esta mezcla sustractiva es el amarillo.

Experiencia 2: algunas mezclas sustractivas y su explicación a partir de los espectros

Materiales:

- Filtros cian, amarillo, magenta, rojo, verde y azul.
- Retroproyector y pantalla.

Las figuras 4a–f muestran los espectros de transmitancia de cada uno de los filtros de la experiencia.

Mezcla de filtros amarillo y magenta. Puede apreciarse en la figura 5a que el resultado de tal mezcla es rojo. El análisis de la figura 5b, donde se representan ambos espectros superpuestos, permite comprobar que la única transmisión conjunta o común de ambos filtros es la correspondiente al rojo.

En ella puede apreciarse que la banda de transmisión azul (400-500 nm) del filtro magenta es eliminada al superponer el filtro amarillo, que no transmite en dicha banda. Por otra parte, la zona espectral 530-600 nm (verde-amarillo) del filtro amarillo queda anulada al superponer el filtro magenta, de transmitancia nula en esa región. La consecuencia final es que el conjunto solo transmite a partir de 600 nm, espectro que equivale al de un filtro rojo, como se puede apreciar en la figura 4e.

Propuesta de experiencia didáctica. Una vez detallada la explicación del resultado de la combinación de los dos filtros anteriores, puede ser relevante plantear a nuestra audiencia interesantes ejercicios de predicción sobre el resultado de otras mezclas sustractivas, desde dos puntos de vista diferentes:

- (a) Deducción del resultado de cierta mezcla sustractiva a partir de la teoría del color por reflexión (y absorción del resto).
- (b) Deducción del resultado de las mezclas sustractivas a partir de los espectros comparados que se mostrarán.

Las mezclas de filtros que se trabajarán serán las siguientes.

- (a) Mezcla cian + amarillo.

(b) Mezcla cian + magenta.

(c) Mezcla cian + magenta + amarillo.

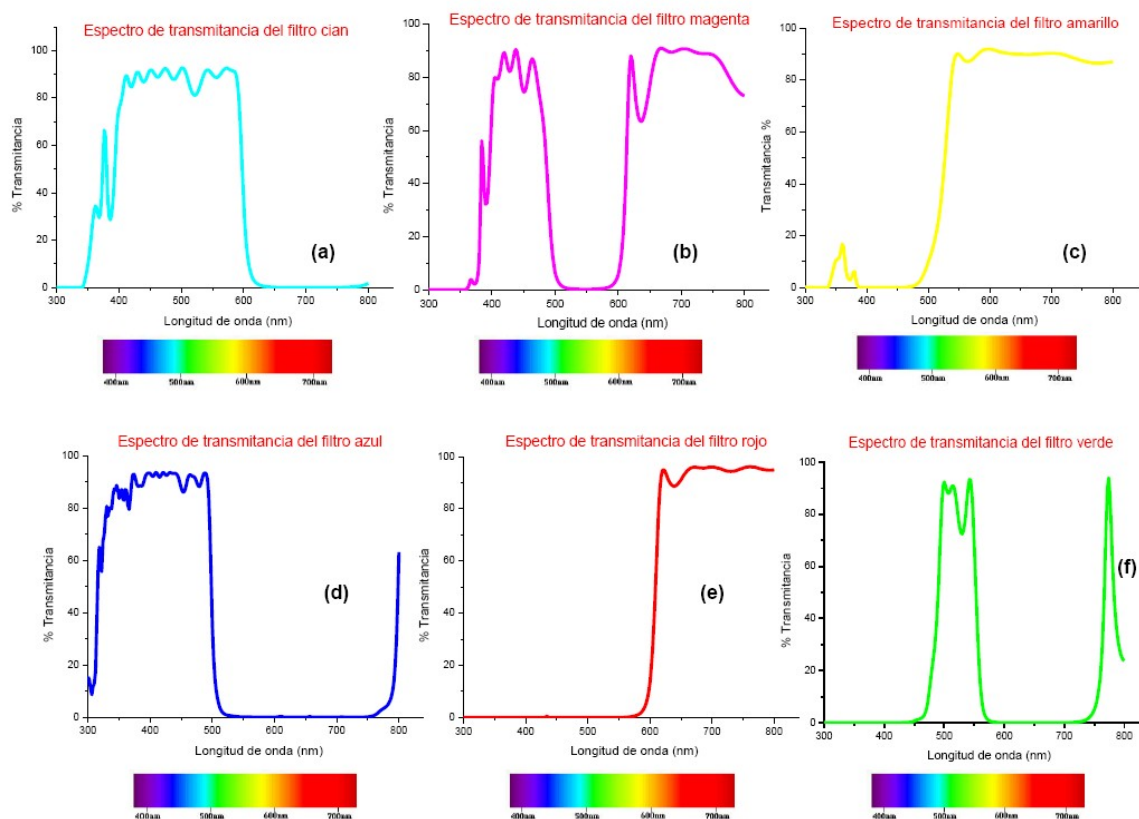


Figura 4. Espectros de transmitancia de los filtros usados en la experiencia: (a) cian, (b) magenta, (c) amarillo, (d) azul, (e) rojo y (f) verde. Se inserta el espectro continuo del visible en la escala inferior a efectos de comparar a qué colores corresponden las zonas de mayor transmisión de cada filtro.

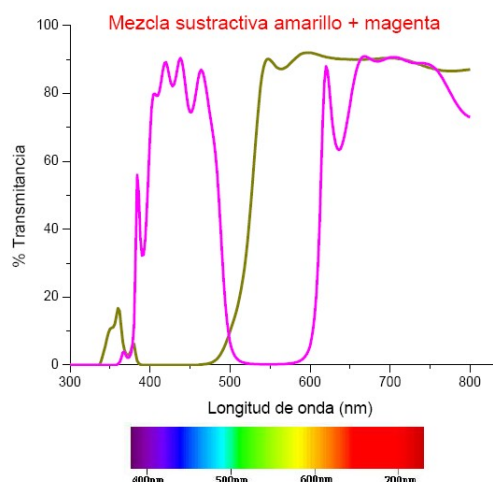


Figura 5. (a) Mezcla sustractiva filtros amarillo y magenta. (b) Espectro comparativo de los filtros amarillo y magenta.

Los resultados que deben obtenerse son los siguientes:

(a) El único color común que transmiten los filtros cian y amarillo es el verde, como ya se comentó en la introducción, que será el resultado que veremos (figura 6a).

(b) En el caso de la mezcla cian y magenta, el azul es el único color común que ambos filtros transmiten, color que percibiremos como resultado (figura 6b).

(c) La mezcla cian, magenta y amarillo dará como resultado el negro, pues no hay ningún color común que transmitan los tres en conjunto (figura 6c).

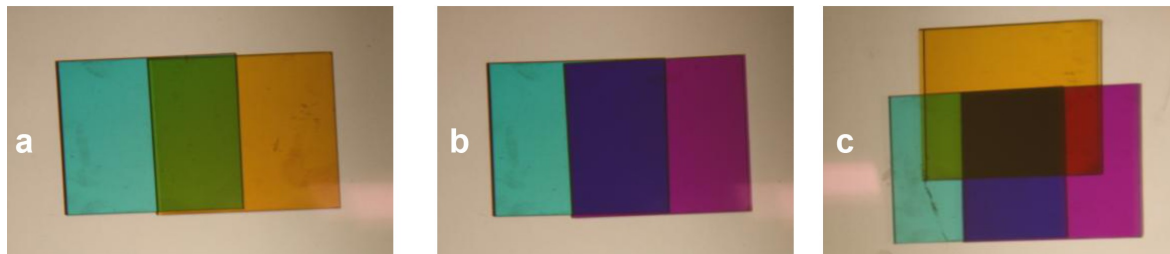


Figura 6. Resultados cromáticos de la superposición de filtros: (a) cian y amarillo, (b) cian y magenta, (c) cian, magenta y amarillo.

Estos resultados pueden deducirse como acabamos de hacer, por teoría del color por reflexión o bien a partir de la interpretación de los espectros de transmitancia conjuntos, como se observa en las figuras 7 a, b y c.

En la figura 7c se observa el resultado de superponer los tres filtros sustractivos. En la región azul, entre 400 y 500 nm transmiten los filtros cian y magenta, pero dicha transmisión es bloqueada por el filtro amarillo. Por el contrario, en la región verde de 500-600 nm, transmiten los filtros cian y amarillo, pero no lo hace el filtro magenta. Finalmente, la transmisión en el rojo (a partir de 600 nm) que presentan los filtros magenta y amarillo es inhibida por el filtro cian, que no presenta transmisión en dicha región.

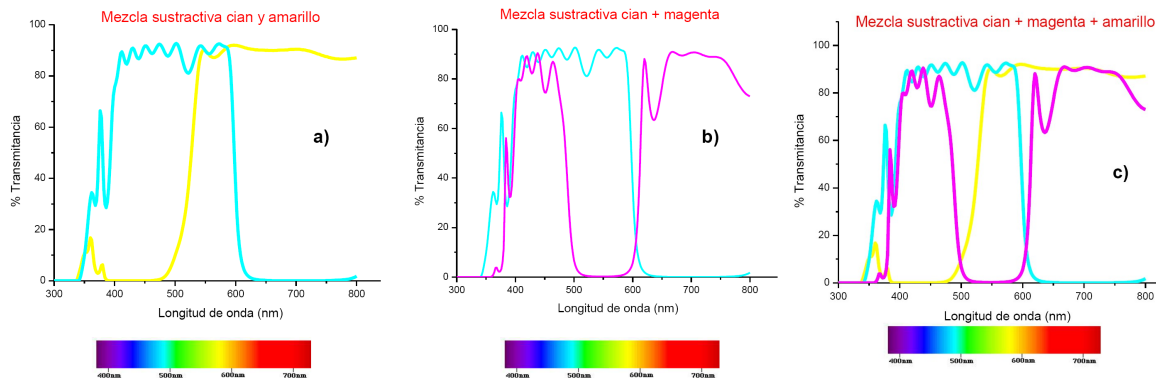


Figura 7. En la figura (a) se aprecia el resultado de la mezcla cian y amarillo; la única banda de transmisión conjunta corresponde al verde. En la figura (b) se observa que la única zona de transmisión común corresponde al azul, mientras que en la figura (c) no hay transmisión posible conjunta de los tres filtros (negro como resultado de la mezcla).

Experiencia 3: pares complementarios

Materiales:

- Filtros rojo, azul, verde, cian, magenta y amarillo.
- Retroproyector

Aplicando la teoría del color, es fácil ver que el azul es el complementario del amarillo (composición de rojo y verde). Por tanto, su mezcla sustractiva dará el negro como resultado.

Esto sucederá siempre que mezclemos sustractivamente dos colores complementarios, como el verde y el magenta o el rojo y el cian (figura 8).

De nuevo el análisis espectral nos permite explicar el resultado de la combinación. En las figuras 9 a–c se han representado conjuntamente los espectros de los filtros que se combinan en la figura 8. En todas las comparaciones espectrales puede apreciarse que en la región donde la transmitancia de uno de ellos es máxima, la del otro es nula y viceversa, de modo que el resultado global de la mezcla es una transmitancia nula o casi nula, percibiéndose como negro el conjunto.

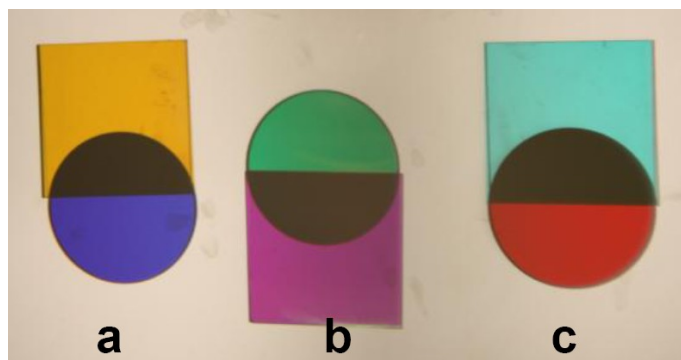


Figura 8. Cuando se mezclan sustractivamente colores complementarios como los que se observan en la fotografía, el resultado es el negro.

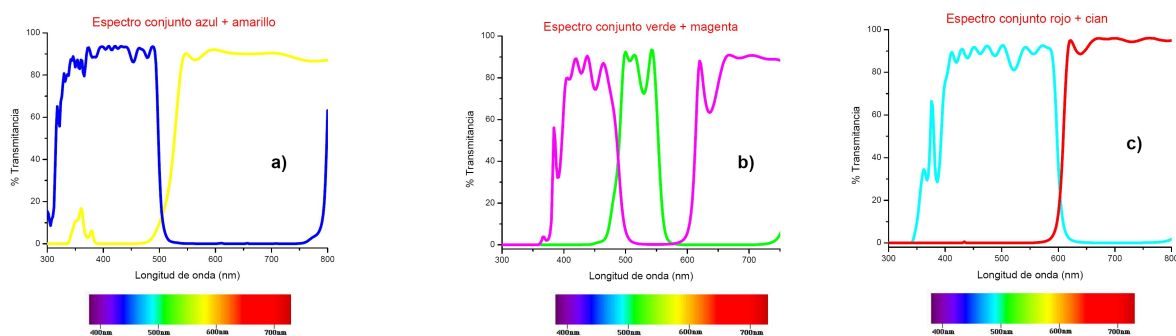


Figura 9. Los espectros comparativos de las mezclas de filtros de las fotografías nos muestran claramente que las transmitancias de los pares seleccionados son complementarias y se anulan mutuamente, por lo que la transmitancia conjunta es nula.

Experiencia 4: los dos tipos de mezclas cromáticas en una sola mirada

Materiales:

- Los seis filtros de la experiencia anterior.
- Retroproyector.
- Pantalla de proyección superior (por ejemplo, una lámina de cartón pluma).

Una de las características de los filtros dicróicos que se sugiere emplear en estas prácticas es que al transmitir un color, reflejan el complementario. No obstante, debe tenerse presente que los filtros dicróicos presentan una fuerte dependencia angular (hecho que se aprecia si movemos el filtro buscando distintas incidencias de la luz). Por tanto, debe tenerse la precaución de trabajar en incidencia normal, que es el modo en que se han obtenido los espectros de transmitancia.

En consecuencia, el filtro rojo (por transmisión) se verá cian por reflexión; el filtro azul en transmisión, se verá amarillo en reflexión, mientras que el filtro verde en transmisión se verá magenta en reflexión.

En cuanto a los filtros cian, magenta y amarillo, sucederá justo lo inverso de lo anterior. En reflexión se verán rojo, verde y azul respectivamente.

Esto ya de por sí es una buena lección de teoría del color en la que se mezclan aspectos tales como transmisión, reflexión y complementariedad de los colores. Pero además, si situamos los filtros sobre un retroproyector y recogemos en una pantalla la luz transmitida por ellos y en otra (en la parte superior o sobre el mismo techo) la luz reflejada, podemos explicar en una misma jugada los principios de la mezcla sustractiva (pantalla directa) y de la mezcla aditiva (pantalla superior), como puede apreciarse en la figura 10.

En la imagen de la izquierda se observan los colores de los filtros por transmisión en la pantalla del fondo, mientras que, proyectados en el techo, aparecen los colores complementarios de los anteriores por reflexión (presentando inversión lateral, como se aprecia por la sombra del dedo).

En la imagen de la derecha puede apreciarse cómo la mezcla sustractiva por transmisión, se convierte en aditiva por reflexión en los colores complementarios (de nuevo presentando inversión lateral).



Figura 10. Colores complementarios, mezcla aditiva y mezcla sustractiva, todo en un mismo bloque.

Experiencia 5: las impresoras tricrómicas y la mezcla sustractiva

Materiales:

- Transparencias con una misma figura en colores cian, magenta y amarillo.
- Retroproyector.

La siguiente es una experiencia que ilustra muy bien cuál es el fundamento de las impresoras a color (tricolor) y que además de ser tremendamente simple, fascina a la mayoría de la gente por la enorme variedad cromática que puede conseguirse mezclando en las proporciones adecuadas tan solo tres colores base: cian, magenta y amarillo.

En las figuras 11 a-c (Hewitt 1995) y 11 d-f (Barrio *et al.* 2008) se exponen tres versiones monocolor (cian, magenta y amarillo) de una misma escena. De cada una de ellas, ampliada, se hace una transparencia exactamente del mismo tamaño de figura. Cuando se superponen las tres aparece la escena con todos sus colores.

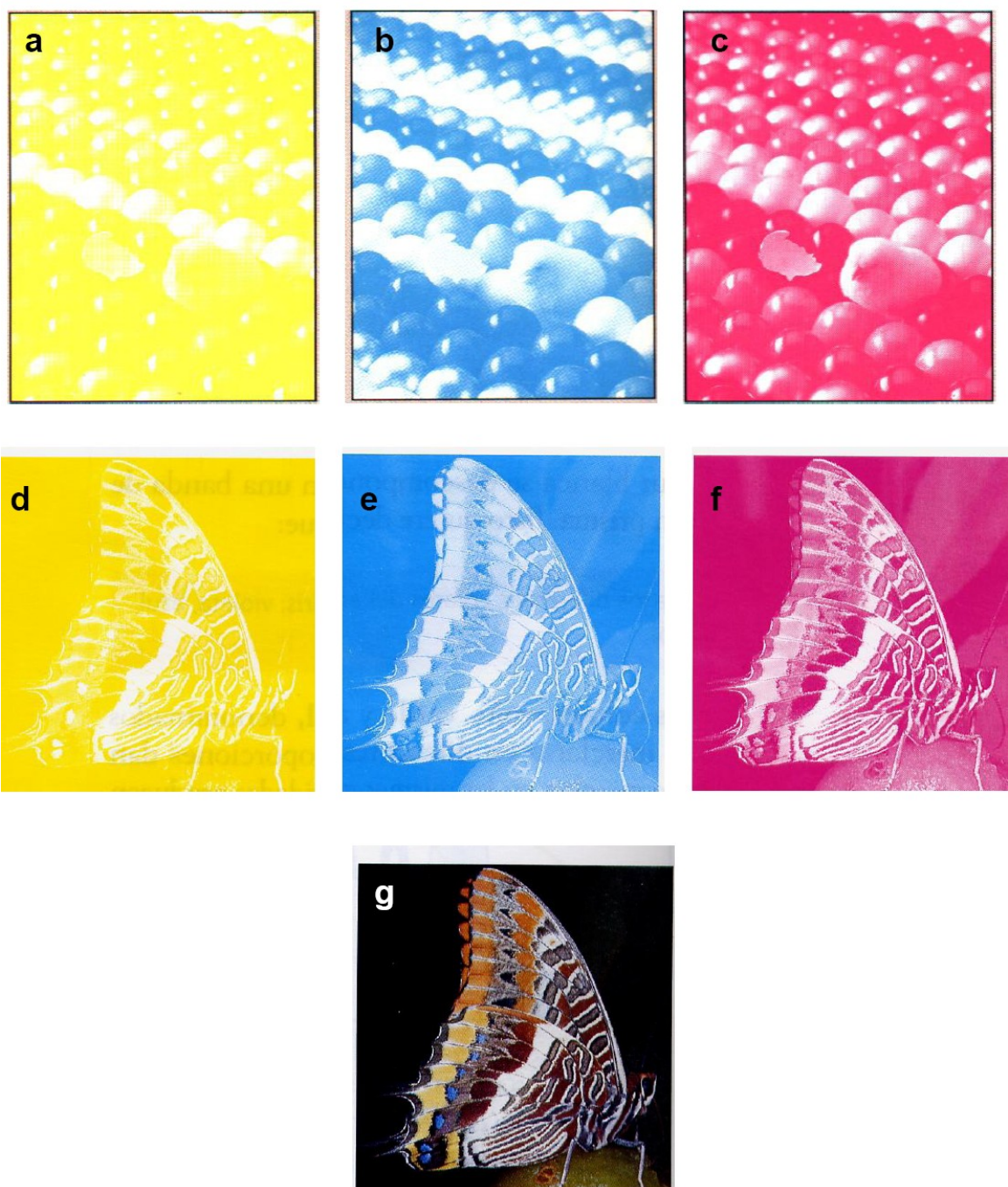


Figura 11. Posibles plantillas para la experiencia (imágenes a-f). En la imagen de la derecha puede apreciarse cuál es el resultado final al superponer las tres transparencias de la secuencia d-e-f. Imágenes a-c: (Hewitt 1995). Imágenes d-g: (Barrio *et al.* 2008).

Conclusiones

La conclusión que podemos extraer de esta y otras posibles experiencias es que sólo puede predecirse el resultado de una mezcla sustractiva si se conocen en detalle los espectros de absorción o de transmitancia de las sustancias involucradas.

Incluso en el caso de los pigmentos, los espectros de absorción no presentan perfiles de corte (*cutoffs*) bien definidos, de modo que estos pueden variar de unos pigmentos a otros a pesar de ser metaméricos (similares cromáticamente en nuestra percepción), por lo cual el resultado de la mezcla puede ser variable (Judd y Wyszecki 1967).

Referencias

- Nassau K. (2001) The physics and chemistry of color, en *The fifteen causes of color*. Nueva York. Wiley Interscience.
- Hewitt P. G. (1995) *Física conceptual*, 2ª ed. Wilmington. Addison-Wesley Iberoamericana.
- Barrio J., Bermúdez M. L., Faure A., Gómez M. F. (2008) *Ciencias de la Naturaleza. 2º ESO*. Proyecto Ánfora. Madrid. Oxford University Press España.
- Judd D. B., Wyszecki G. (1967) *Color in business, science and industry*. Nueva York. Wiley.